

袖阀管灌浆技术在输水暗涵沉降纠偏中的应用

李洪斌¹, 梁锦², 邱浩³

(1. 山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东黄河勘测设计研究院有限公司, 山东 济南 250014;
3. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014)

【摘要】以袖阀管灌浆技术在南水北调济南市区段输水暗涵沉降纠偏中的应用为例, 结合袖阀管注浆工艺特点, 提出了分序多次循环灌浆抬升的施工工艺, 并通过有限元数值模拟计算和实测数据分析, 验证了袖阀管注浆在水工建筑物纠偏中的可行性和有效性, 为类似工程提供了经验参考。

【关键词】袖阀管灌浆; 沉降纠偏; 输水暗涵; 数值模拟

【中图分类号】 TV543

【文献标志码】 A

【文章编号】 1009-6159(2025)-11-0033-05

Application of Sleeve Valve Pipe Grouting Technology in Settlement Correction of Water Diverting Culvert

LI Hongbin¹, LIANG Jin², QIU Hao³

(1. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy co., Ltd, Jinan, Shandong 250014, China;

2. The Yellow River Survey, Design and Research Institute Co., LTD., of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China;

3. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Taking the application of sleeve valve pipe grouting technology in the settlement correction of water diverting culvert in Jinan urban section of the South-to-North Water Diversion Project as an example, and combined with the characteristics of sleeve valve pipe grouting process, a construction process of sequential and multiple cyclic grouting lifting is proposed. Through finite element numerical simulation calculation and measured data analysis, the feasibility and effectiveness of sleeve valve pipe grouting in the correction of hydraulic structures are verified, providing experience reference for similar projects.

Key words: Sleeve valve pipe grouting; Settlement correction; Water diverting culvert; Numerical simulation

注浆抬升纠偏技术是通过将水泥浆液注入建筑物下部土体, 使土体产生体积变形, 从而形成向上的顶托力, 实现建筑物沉降纠偏。目前国内该技术已被广泛应用在建筑、交通等行业。袖阀管灌浆是法国 Soletanche 灌浆公司首创的灌浆工艺(又称索列坦休斯法), 相较传统的注浆工艺, 袖阀管灌浆具有返浆量小、可循环灌浆、过程易控等优点, 在建筑物注浆抬升纠偏中适用性较好。本文以南水北调济南市区段输水暗涵地基加固及纠偏工程为例, 通过分析袖阀管注浆施工工艺特点, 结合有限元数值模拟计算成果和实际监测数据, 验证了袖阀管注浆在水工建筑物沉降纠偏中的可行性和有效性。

1 工程概况

南水北调工程穿越济南市区段采用无压暗涵输水, 总长 23.367 km。输水暗涵位于小清河左岸河道绿化带外侧, 为钢筋混凝土结构, 三舱布置, 每节长 15 m, 外径尺寸 16.9 m×5.95 m(宽×高), 断面净尺寸 3-4.9×4.7 m(孔数-净宽×净高), 基础处理自上而下分别为 100 mm 厚素混凝土垫层, 150 mm 厚碎石垫层, 1 200 mm 厚石屑换填, 800 mm 厚抛石挤淤。2020 年供热管网三期工程采用顶管施工工艺于航运路附近下穿南水

收稿日期: 2025-02-12

作者简介: 李洪斌(1992—), 男, 工程师

北调输水暗涵。顶进管道共两根,管中心线间距4.2 m,管外径为 DN2860,管顶距暗涵底 7.3 m,管材采用Ⅲ级钢筋混凝土公路过路专用顶管,顶管采用土压平衡顶管掘进机进行施工。

顶管施工过程中,通过位移监测发现顶管行进至 1# 输水暗涵下方时,1# 暗涵东侧端部 XA15 监测点沉降量开始增大,累计最大沉降量为-20.3 mm,顶管完工后沉降值逐渐稳定于 17 mm 左右。观测累计沉降量已超过输水暗涵最大沉降位移控制值 10 mm,同时 1# 输水暗涵与相邻的 2# 输水暗涵沉降差在 15 mm 左右。沉降量过大表明顶管施工对暗涵下部土体扰动较大,土体存在空隙增大、脱空、不密实等情况,可能导致暗涵后续持续沉降,影响暗涵结构安全。同时,不均匀沉降将导致暗涵接缝处止水带撕裂破坏等问题,导致暗涵漏水,影响输水工程的安全运行和工程效益。

针对输水暗涵沉降问题,经前期方案比选,袖阀管灌浆纠偏方案具有施工工艺成熟、可动态控制建筑物抬升量、对现状暗涵结构影响较小、施工风险低等优点。因此,本次采用袖阀管灌浆工艺对暗涵沉降问题进行纠偏处理。

2 注浆方案设计

2.1 袖阀管灌浆纠偏原理

袖阀管主要由外管、内管(花管)、橡胶套、密封圈、套壳料组成。当通过泥浆泵将浆液注入袖阀管时,受内压作用,橡胶套将脱开,并挤破套壳料,从而将浆液注入土体。当灌浆压力减小时,受外压作用,橡胶套收缩将管壁开孔封闭,从而起到逆止阀作用。因此,采用袖阀管灌浆时可通过黏土浆置换注浆浆液,实现重复循环灌浆。

注浆抬升在灌浆初期,因产生的浆体体积较小,压力多沿管侧壁开孔成水平向传递;当土体内注浆量持续增加时,通过对灌浆范围土体产生压密、劈裂,从而将产生向上的压力,抬升建筑物。此效果在灌浆部位四周有约束的情况下尤为明显。

本次采用袖阀管灌浆纠偏,注浆抬升施工遵循分序、分次的原则,每次抬升量控制在 3~5 mm,反复注浆抬升至设计高程。

2.2 注浆抬升设计方案

1) 灌浆孔及止浆帷幕布置。输水暗涵每舱共

2 排注浆管,管间距自暗涵分缝至远端为 1.0 m、1.5 m、2.5 m、3.5 m、4.5 m,管中心距边墙(隔墙) 1.0 m。孔位布置靠近暗涵侧墙或隔墙,使得灌浆抬升时充分利用暗涵结构强度,保证暗涵结构安全。抬升灌浆管长度 6.85 m。

注浆顺序遵循由两侧注浆孔向中间按序依次注浆,以防止暗涵抬升过程中不均匀变形。单孔袖阀管注浆采用自下而上分层注浆。注浆抬升布置如图 1、图 2 所示。

在沉降 1# 暗涵两侧设置止浆帷幕,采用袖阀管灌浆成墙,共设两排灌浆孔。内侧帷幕中心线距暗涵边缘 1.00 m,孔间距 1.0 m,孔深 13.90 m,孔底高程约为 11.50 m,单侧灌浆帷幕轴线总长 24.0 m。止浆帷幕可对抬升孔灌浆施加两侧施加约束,能有效增大抬升力,同时可以加固暗涵两侧土体,防止不均匀抬升。

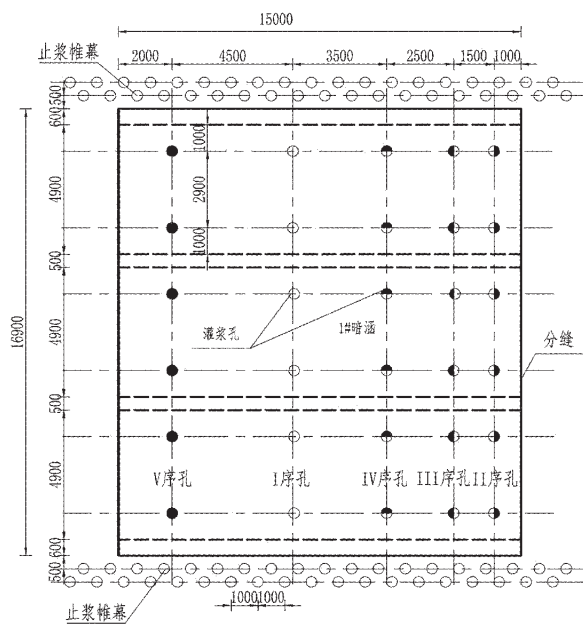


图 1 注浆抬升平面布置图

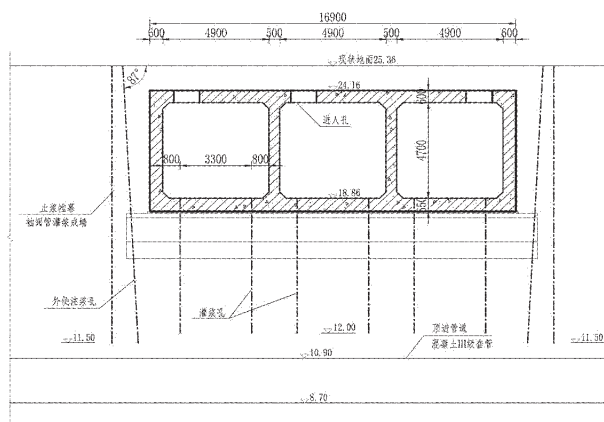


图 2 注浆抬升横剖面布置图

2) 灌浆管设计。该次袖阀管采用 PVC 管作为外管,直径 50 mm,每段长 1.0 m。注浆管内壁光滑,接头设螺扣,端头设斜口,外壁设有加强筋以提高其抗折强度。注浆管分 A、B 两种型式。A 型注浆管侧壁不设溢浆孔,B 型注浆管侧壁设 $\phi 8$ 溢浆孔 6 个。B 型注浆管开孔部位外侧设置橡胶套。根据注浆要求,在注浆管管底 2 m 范围内采用 B 型外管,其他部位采用 A 型外管。

内管(花管)采用 $\phi 20$ 的焊接钢管加工而成,单节长 1.0 m,其四周均匀地布设了 12~18 个 $\phi 8$ 泄浆孔。内管两端设有 4 个止浆橡胶皮以形成阻浆塞,起止浆作用。袖阀管结构示意图如图 3 所示。

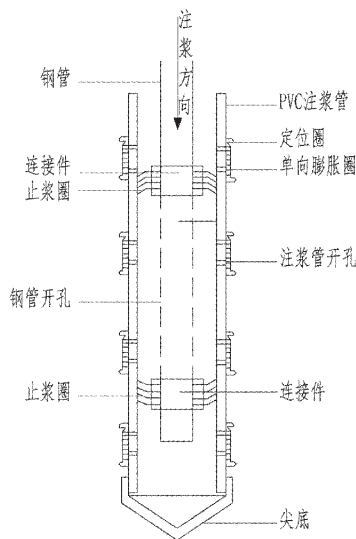


图 3 袖阀管结构示意图

3) 灌浆材料设计。袖阀管灌浆所需制备材料主要有止浆固管料、袖阀管套壳料、注浆浆液、封孔料。

止浆固管料采用水泥黏土浆,水:水泥:黏土=1:1.75:1.25(重量比),根据现场情况考虑采用水玻璃或氯化钙作为速凝剂。在袖阀管外花管与孔壁之间的环状间隙处下入注浆管,在孔口上部 0.5 m 内孔段压入止浆固管料,待止浆固管料凝固后才可进行下一步灌浆,待凝时间一般为 2~5 d。

袖阀管套壳料采用水泥黏土浆,水:水泥:黏土=1.3:1:1.4。

注浆浆液采用水泥粉煤灰浆,水:水泥:粉煤灰=1:0.6:1。灌浆的前期阶段,应先使用稀浆加压开环。在加压过程中,一旦出现压力突降,进浆量剧增,表示已经“开环”。开环后即按设计配比开始正式注浆。

封孔料采用水泥黏土浆,水:水泥:黏土=1:1.5:0.5。

每次注浆后,应注入黏土浆,将袖阀管内残留水泥浆置换干净,并将灌浆孔采用塞子封闭,以备进行重复注浆。

4) 灌浆施工工艺流程。钻孔下管后,及时灌注套壳料。注浆孔按照施工计划分序、分次进行灌浆,单孔每次灌浆间隔控制在 10~30 min 以内。具体灌浆施工流程如图 4 所示。

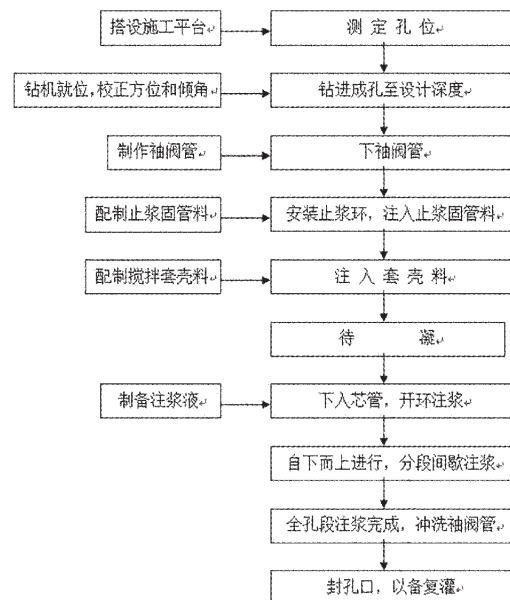


图 4 袖阀管灌浆施工工艺流程图

3 注浆压力数值模拟

3.1 数值模拟方法的选取

有限元数值模拟灌浆过程一般采用“应变法”和“应力法”。应变法是通过“注浆单元”施加体积应变增量,从而模拟注浆过程土体单元应力应变变化。该模拟方法在计算前需根据土层性质和注浆量,对注浆范围和单元应变进行假定。应力法是通过“注浆单元”施加膨胀应力,从而模拟注浆过程。该模拟方法较为复杂,需根据注浆压力假定注浆单元的膨胀应力,但工程实际中泥浆泵的控制注浆压力往往与注浆土体所受压力存在较大差异。

本次数值模拟采用“应变法”,通过 midas GTS NX 有限元软件进行注浆模拟计算。根据数值模拟计算结果,为施工注浆压力和抬升效果提供参考。根据工程实际,建立输水暗涵、顶管管道及地基整体有限元计算模型,模型宽度 50 m,长度 60 m(顺水流方向),高度 30 m,模型如图 5 所

示。输水暗涵、顶管管道采用线弹性本构模型,土体采用莫尔-库伦本构模型,各土层物理力学性质指标见表 1,输水暗涵及管道力学参数见表 2。

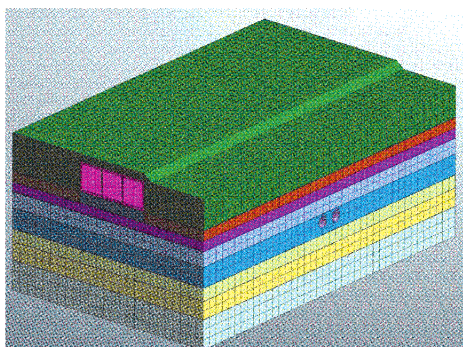


图 5 注浆抬升三维有限元计算模型

表 1 土层物理力学性质指标表

层号	土层名称	层厚/ m	泊松 比	容重/ (kN·m ⁻³)	粘聚 力/kPa	内摩 擦角/°	压缩 模量/ MPa
1	杂填土	7.3	0.29	19.0	3.0	12.0	3.00
2	淤泥质 黏土	2.0	0.29	17.3	8.2	10.9	2.46
3	粉质黏土	3.0	0.28	20.0	27.9	15.6	4.65
4	黏土夹 姜石	4.0	0.29	19.7	28.5	16.7	6.28
5	残积土	2.5	0.29	18.5	29.3	16.4	10.00
6	全风化岩	3.5	0.25	20.0	27.0	27.0	20.00

表 2 输水暗涵及管道力学参数

序号	名称	材质	容重/ (kN·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比
1	输水暗涵	C30 钢筋混凝土	25.0	3×10 ⁴	0.167
2	顶管管道	Ⅲ级钢筋混凝土	24.0	3.45×10 ⁴	0.20

3.2 模拟计算

采用施工阶段模拟注浆施工过程。灌浆孔共分 5 序,其中 I 序、II 序孔注浆一次,注浆后与止浆帷幕形成封闭区域;Ⅲ序、IV 序孔作为主要抬升注浆孔,每序注浆三次;V 序孔作为补充注浆孔,注浆一次。

本次计算通过对注浆单元施加体积应变模拟注浆过程。注浆范围位于第 4 层黏土夹姜石地层,该层可塑,含姜石,含量 5.0%~15.0%,粒径 2.0~5.0 cm,局部孔隙、裂隙较发育,无充填,透水性较强。根据工程地质情况及相关参考数据,第一次注浆每序注浆单元体积应变每立方米取 1%,第二、三次注浆每序注浆单元体积应变每立方米取 2%。在施工阶段模拟中,每序注浆孔完

工后,更改注浆单位的刚度,从而模拟注浆-土结过程。

计算输水暗涵位移云图如图 6、图 7 所示;计算注浆压力如图 8 所示,数值模拟计算结果见表 3。

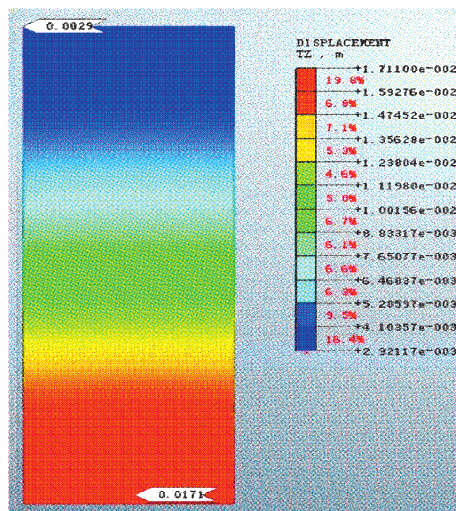


图 6 Ⅲ序孔-3 暗涵位移云图

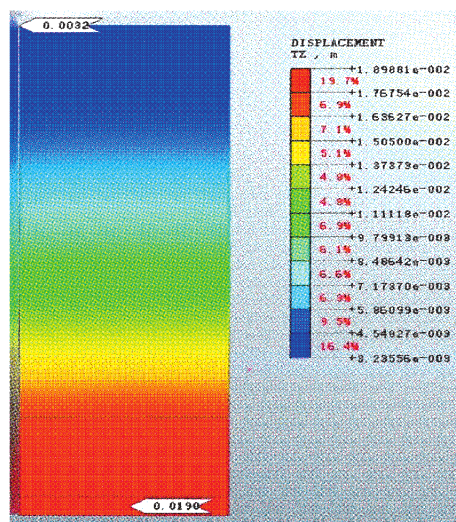


图 7 IV 序孔-3 暗涵位移云图

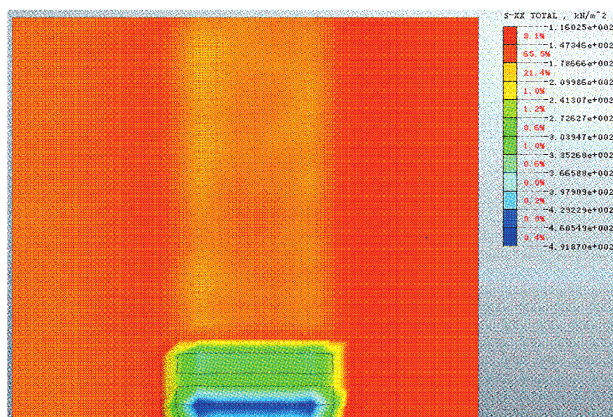


图 8 IV 序孔-3 注浆单元应力云图

表3 数值模拟计算结果

模拟施工阶段	暗涵东侧 位移/mm	暗涵西侧 位移/mm	单元应力/ MPa
I序孔-1	1.2	0.4	0.28
II序孔-1	3.1	0.9	0.31
III序孔-1	7.4	1.8	0.47
III序孔-2	10.8	2.0	0.52
III序孔-3	13.2	2.2	0.55
IV序孔-1	15.0	2.6	0.53
IV序孔-2	17.1	2.9	0.54
IV序孔-3	19.0	3.2	0.57
V序孔-1	19.1	3.6	0.28

经计算,注浆完工后,1#暗涵最大竖向位移19.1 mm(东端),最小竖向位移3.6 mm(西端),I、II、V序孔注浆单元应力为0.28~0.31 MPa,III、IV序孔单元应力为0.47~0.57 MPa。根据计算结果,确定注浆管注浆压力:I、II、V序孔注浆压力为0.2~0.3 MPa;III、IV序孔注浆压力为0.4~0.6 MPa。

因袖阀管注浆工艺性较强,处理效果受地质条件、施工工艺等因素影响,因此在施工过程中,注浆压力应根据暗涵实际变形位移情况进行动态调整。

4 监测数据分析

2023年7月8日,南水北调输水暗涵加固抬升工程开始施工;7月17日完成止浆帷幕及灌浆孔钻孔施工;7月18日完成I、II序孔注浆施工;7月20日完成III、IV序孔注浆施工;7月21日完成V序孔注浆施工。第三方监测单位对注浆过程及完工后输水暗涵沉降进行持续观测,观测数据如图9所示。

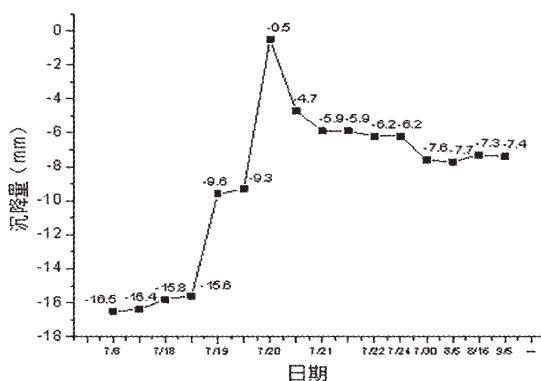


图9 输水暗涵XA15监测点垂直沉降累计量

由图9可见,实际观测数据,I、II序孔采用低压注浆,主要作用为与止浆帷幕共同形成封闭

区域,对输水暗涵抬升影响较小;III、IV序孔注浆施工后,暗涵端部抬升16 mm,效果较为明显;随着注浆浆液固结,暗涵出现6~7 mm小幅度沉降并趋于稳定;最终沉降量满足沉降控制值要求。通过实测数据分析,实际建筑物抬升过程与数值模拟计算结果基本一致。

5 结语

文章以南水北调济南市区段输水暗涵沉降纠偏为研究对象,分析了袖阀管灌浆纠偏施工工艺特点、有限元数值模拟计算结果、实际观测数据,由此得出以下结论:

一是注浆抬升应根据所需纠偏建筑物的结构、尺寸,合理的布置注浆孔间距、深度是保证注浆抬升有效性和安全性的关键。同时,注浆抬升应遵循分序、多次的原则,并严格控制每次注浆建筑物抬升量,以防止出现“突起、突沉”等现象。

二是在有限元数值模拟中,通过对注浆单位施加体积应变,能够有效的模拟注浆压力和建筑物抬升过程,为后续施工提供参考依据。

三是通过设置止浆帷幕和制定合理灌浆施工工序,对所需抬升纠偏的建筑物下部土体形成封闭空间,能够有效的提高施工效率和注浆抬升效果。

四是袖阀管灌浆技术具有返浆量小、可循环灌浆、过程易控等优点,在水工建筑物注浆抬升纠偏中,可实现动态控制,具有良好的适用性。

参考文献

- [1] 冯旭海. 压实注浆作用机理与顶升效应关系的研究 [D].北京:煤炭科学研究总院,2003.
- [2] 郎健政,管月稳,王杰.岩土注浆理论与工程实践[M]北京:科学出版社,2001.
- [3] 程晓,张凤祥,土建注浆施工与效果检测[M]上海:同济大学出版社,1997.
- [4] 唐智伟,赵成刚,张顶立.地下工程抬升注浆设计方法及其抬升效果预测研究[J].土木工程学报,2007,40(8):79-84.
- [5] 吴顺川,金爱兵,高永涛.袖阀管注浆技术改性土体研究及效果评价[J].岩土力学,2007,28(7):1353-1357.
- [6] 章敏,刘军军,秦文权.注浆抬升位移预测及简化模型研究[J].太原理工大学学报,2015,46(3):298.
- [7] 李立新,童无欺,邹金锋.注浆抬升位移的随机介质理论预测方法[J].铁道科学与工程学报,2013,10(5):47.
- [8] 孙锋,张顶立,陈铁林,等.土体劈裂注浆过程的细观模拟研究[J].岩土工程学报,2010,32(3):474.

(责任编辑 赵其芬)